

최적 관개 계획

Optimal Irrigation Scheduling

박 상 현*
Park, Sang-hyun

1. 머리말

관개 계획(Irrigation scheduling)이란 작물이 필요로 하는 관개 용수량과 관개 시기를 결정하는 의사 결정 과정(Decision making process)으로 정의된다. 이와 같은 관개 계획을 수립하는데는 기상 조건과 수자원의 공급 능력, 작물의 생육 단계별 필요수량의 요구 형태, 관개시설의 규모와 관리 형태, 토양의 구조와 보수력, 관개에 의한 수익성 등에 관한 현장 자료가 필요하다. 이와 함께 전기 시설의 관리, 토양의 염분 관리, 수확기의 생산물 품질관리, 농장 관리에 필요한 인부의 확보 등도 중요한 과제이다. 이와 같이 관개 계획을 수립하는데에는 수많은 고려 사항이 요구되며, 실제로 이에 관련한 많은 연구가 계속되고 있다. 1970년대 이후 석유 에너지 파동과 함께, 농업 생산력이 타 산업에 비하여 상대적으로 저하됨에 따라서 효율적인 관개 계획의 수립 기법이 요구되고 있다. 또한, 1980년대 이후 관개 계획은 종래의 목표인 적절한 생육 상태를 유지하는 것보다는 생산성과 수익성에 좀더 역점을 두고 있다. Huygen(1995) 등은 관개 계획의 목표를 제한된 용수원을 이용하여 지하수의 오염과 관개에 필요한 비용을 최소화하여 수익성과 생산량을 최대화하는데 두고 있다. 이러한 목표를 성취하려면 농장 규모에 따라서, 언제 얼마의 물을 공급할 것인가를 파악하는 것이 중요

하다. 또한, 과잉의 용수를 공급하는 것은 생산물의 품질과 수량을 저하시키는 점에 유의하여, 토양 수분의 변화와 작물의 생육 상태 그리고 기상 조건에 따른 물수지 관계를 예측하는데 관한 연구 수행과 이의 보급이 중요한 과제로 대두되고 있다.

2. 관개 계획 수립을 위한 토양수분의 측정

경지내에서 토양 수분의 유지 수준은 생산량에 직접 영향을 주는 증발산량의 변화에 크게 기여하며, 토양 수분 자체도 생산량 예측에 활용할 수 있기 때문에 관개 계획 수립에 있어서 가장 중요한 사항이다. 이러한 토양 수분의 변화 과정은 다음과 같이 토양 수분의 수지방정식에 의하여 나타낼 수 있다.

$$S_2 - S_1 = I + P - AET - R - DP \quad (1)$$

여기서, S_2 와 S_1 는 관개 전후의 토양 수분이며 I 는 관개량, P 는 강우량, AET 는 실제 증발산량, R 는 농장의 지표 유출량, DP 는 지하 삼투량이다. 이와 같이 작물의 생육에 영향을 주는 토양수분은 토양 용적내에서 작물이 이용할 수 있는 수분량의 백분율(%) 또는 이의 심도(mm)로 표시된다. 이는 포장 용수량(Field capacity)에 대한 이용가능한

* 농어촌진흥공사 농어촌연구원

수분의 함수비(Available soil water content)이다. 토양수분의 측정방법 중 간단한 것은 텐시오미터(Tensiometer)를 이용하는 것이며, 이는 토양수분의 정도에 따라 구별되는 토양의 모관력을 이용하는 방법으로서 측정이 간단하다. 그러나 이 장비의 측정 범위는 0~-0.8bar 정도로서 토양수분이 건조한 경우 과장된 값을 나타낼 우려가 있으며, 심층의 토양 수분 측정이 어렵고, 고랑관개와 점적관개에 있어서 공간적인 토양 수분의 변화를 나타내기 어렵다. 또한, 토양을 채취하여 중량을 재고 이를 건조상태의 중량과 비교하는 방법이 있으나, 이는 건조 과정이 많은 시간과 노력을 요한다. Phene(1990) 등은 Microwave 건조기와 일반 저울을 이용하여 이 방법을 개선한 바 있다.

이에 비하여 중성자 측정기(Neutron probe)는 측정이 비교적 간단하고 과학적이다. 이 방법은 측정기에서 방출한 방사성 중성자가 토양내 물 분자의 수소 핵과 반응하여 분산되거나 저감되는 특성을 이용하여 토양수분의 함유정도를 예측하는 방법이다. 장비의 측정치와 토양 수분의 수준에 관한 함수를 도출하기 위하여 현장 토양을 수분 유지 수준별로 채취하여 건조 중량과 습윤 중량을 측정하여야 한다. 또한, 측정 기술과 장비의 설치 운용 등 전문성이 요구되고, 장비가 비싼 단점이 있으며, 표토로부터 30cm 정도까지는 중성자의 산란이 심하여 측정 결과를 이용할 수 없다.

3. 관개 계획의 수립

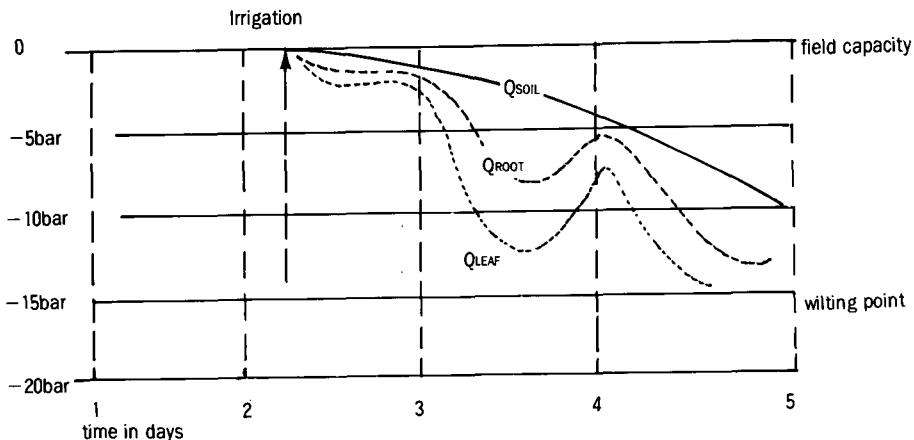
가. 관개 계획과 작물의 생육 저해 수준

1970년대 초반까지의 관개 계획은 작물의 생육에 지장을 주지 않는 수준의 용수를 공급하는 것이 기본적인 목표였다. 일반적으로, 대부분의 작물들은 과중기에 적절한 용수를 공급하는 경우 생육이 무리없이 진행되어, 약간의 가뭄은 뿌리의 성장을 촉진시킬 수도 있다. 또한, 일부 작물은 수확기의 생육에 있어서 토양을 건조시킬 필요가 있다. 이러한 작물의 생육 단계별 성장 상태에 따른 용수공급 기준을 마련한 것은 Hiler와 Clark(1971)에 의한 연구 결과이다.

이들은 생육 단계별 적절한 생육 저해 수준(Stress Day Index : SDI)을 설정하여 관개시기를 정하도록 하였다.

$$SDI = \sum_{i=1}^n SD_i \times CS_i \tag{2}$$

여기서, SD_i는 i 생육단계에서 작물의 수확에 영향을 주는 용수고갈 정도를 나타내는 계수이다. Hiler와 Clark(1971)는 SDI가 증가할수록 생산량이 선형적으로 감소하는 일차 방정식을 도출한 바 있다. SD는 엽면의 수분 공급량 또는 토양내 이용가능한 수분 등으로 표시된다. <그림-1>은 용수공급후 증발산에 따른 토양수분 압력(Soil



<그림-1> 작물의 증발산에 따른 토양과 뿌리 및 엽면의 압력변화 모식도

mass water potential : Q_{SOIL})과 뿌리 표면의 압력(Root surface water potential : Q_{ROOT}), 엽면의 압력(Leaf water potential : Q_{LEAF})을 나타내는 모식도이다. 그러나, 엽면과 뿌리의 압력 변화를 정확하게 측정하거나 이에 대한 측정 결과를 관개 계획에 활용하는 것은 비교적 어렵기 때문에 대부분 토양수분의 백분율을 이용하게 된다.

예컨대 관개시점의 허용 토양 수분을 50%로 가정한다면 이는 SD 설정에 좋은 기준이다. Hiler (1974)는 작물의 생육 단계별로 CS 값을 도출하였다. 이에 따르면 개화기와 수확기에 발생하는 고갈 정도는 생산에 주는 영향이 크다. 이러한 예들을 이용한 SDI 방법에 의하여 콩의 관개가 필요한 토양 수분의 생육 단계별 허용 고갈 수준을 계산하면 다음과 같다. 이에 따라 작물의 생육 시기별 허용 고갈 수준에 따라서 관개를 시행될 수 있다.

<표-1> 작물의 생육 단계별 관개시기의 SD에 따른 SDI₀ 계산

생육단계	CSi	SD	SDI	SDI ₀	SDirr
파종기	0.25	50%	12.5%	16.5%	66%
개화기	0.36	50%	18.0%	16.5%	45%
수잉기	0.45	50%	22.5%	16.5%	36%
성숙기	0.25	50%	12.5%	16.5%	66%
SDI			65.5%		

<표-1>에서, SD는 관개가 필요한 것으로 미리 간주하는 토양 수분으로서 이용가능한 용수량과 용수 경비 등에 따라 50%로 가정한 것이다. 여기서 일별 SDI가 SDI₀에 이르면 관개가 시작하는 것이 원칙이지만 실제로는 일률적으로 정할 수 있기 때문에 50%를 실행 기준으로 정하였다. 이에 따라서 SDI₀는 총 생육 단계의 SDI 값인 65.5%를 생육단계 수(=4)로 나눈 값인 16.5%로 정해지며, 각각의 생육 단계별 SDirr는 SDI₀를 CS로 나누어 산정된 값이다. 여기서 SDI의 실행 기준과 산정 결과의 차이는 토양 수분 변화과정에 있어서 생산량의 변화에 큰 영향을 주는 것이 아니다. 따라서, SDI 방법은 관개 계획에 널리 이용되지 못하였으며 다만, 생산량과 관개 용수량의 관계를

개선하는데 간접적으로 기여하고 있다.

나. 관개계획과 작물의 생산량

생육저하 수준과 생산량에 관한 SDI 이론은 1983년 Hiler와 Howell 등에 의하여 개선되었으며 생산량에 대한 관개계획의 영향에 관한 연구는 증발산량에 의하여 집중적으로 연구되었다. 이는 증발산량이 관개에 의한 토양수분의 유지수준과 기상 특성을 포괄적으로 나타낼 수 있기 때문이다. 마초식물을 제외한 작물의 생육 단계는 파종기, 개화기, 수확기 등으로 분류된다. 또한, 건조지대에서는 파종에 앞선 기간에 토양 수분을 포장용수량 상태로 미리 회복시키기도 한다. 1975년 Stewart는 생산량을 증발산량의 함수로서 도출하였다. 즉, 생산량은 증발산량에 비례적으로 증가하며 이는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$Y/Y_{max} = fn(ET/ET_{max}) \quad (3)$$

여기서, Y는 생육기간의 누가 증발산량이 ET (mm)일 때 생산량(kg)이며, Y_{max}는 최대 생산량으로서 이때의 누가 증발산량은 ET_{max}이다.

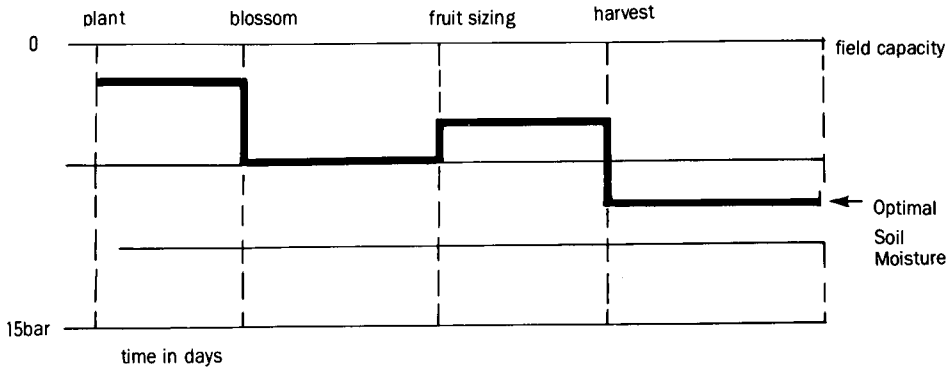
또한 Y/Y_{max}는 상대 생산량(Relative crop yield)이라 한다. 위 식에서 누가 증발산량은 생육 단계별로 세분화하고 특히, 생육 단계별 최적의 증발산량을 도출하여 생산량을 최대화하는 연구가 Jensen(1968)에 의하여 이루어진 바 있다.

$$Y/Y_{max} = \sum_{i=1}^n (ET/ET_{max})_i^{b_i} \quad (4)$$

여기서, n는 총 생육 단계 수이며, b_i는 i 단계에서 수분 고갈에 의한 생육저하 상태를 나타내는 예민도이다. 그러나, 관개계획에 있어서 증발산량을 미리 예측하는 것은 어렵기 때문에 식(5)와 같이 생육단계별 토양수분을 관개 계획에 활용하며 생산량을 최대화하는 생육 단계별 토양 수분의 실험 결과와 비교하여 생산량을 예측할 수 있다.

$$Y/Y_{max} = \sum_{i=1}^n (SM_i/SM_{oi})^{b_i} \quad (5)$$

여기서, SM_i는 i 단계의 토양수분이며, SM_{oi}는



〈그림-2〉 작물의 최대 생산량을 나타내는 생육 단계별 토양 수분의 유지 수준

i 단계의 최대 수확량을 생산하게 하는 토양 수분이다. 〈그림-2〉는 생육 단계별 최대 생산량을 나타내는 토양 수분의 유지수준을 나타내는 모식도이다.

4. 영농 수익성을 고려한 최적화 관개 계획

전통적인 관개 계획에서는 관개에 따른 영농수익에 관하여 별다른 관심을 두지 않았다. 그 이유는 관개비용이 별로 크지 않았으며, 관개에 투자되는 비용과 생산 수익의 관계가 강우량 등의 입력 요소의 확률적 처리의 어려움 때문에 분명하지 않으며, 관개에 의한 생산영향 관계를 함수로 나타내는데 어려움이 있기 때문이었다.

이러한 문제를 Yaron(1971)은 정량적으로 평가 보완하였다. 우선 그는 생산량과 관개용수의 관계를 다음과 같이 함수화 하였다.

$$Y=fn(Q,D,F) \tag{6}$$

여기서, Y는 생산량이며, Q, D, F는 각각 용수량과 관개심도 및 관개 주기를 나타낸다. 따라서 생산량을 최대화 하려면 관개와 관련된 인자들을 관리하여야 한다. 즉, 식(6)를 미분한 형식과 같다.

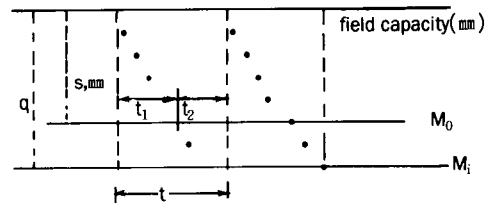
$$Y_{max}=f'_n(Q, D, F) \tag{7}$$

생산량 함수가 도출되면, 이에 따른 제 경비인 파종, 비료 방제, 수세, 인부, 수확비용 등을 산출하여 다음의 수익 비용 함수를 도출할 수 있다.

$$NB=A\{Y(q)Py-h(q)-QPq-FC-YC\} \tag{8}$$

여기서, NB는 순수익(Net benefit)이며, A는 관개면적, Y(q)는 관개량 Q에 따른 생산량이며, Py는 생산물의 시장 판매 단가이며, h(q)는 비료 방제 등의 간접 비용, Q는 관개량, Pq는 수세, FC는 고정비용, YC는 생산에 따른 제 경비이다.

이와 같은 수익성을 Wu와 Ling(1972)은 관개 계획에 직접적으로 반영하였다. 〈그림-3〉은 수익성을 고려한 관개량과 관개 시기를 설명하기 위하여 만든 것이다.



〈그림-3〉 최적 관개량과 관개시기 결정 계획

〈그림-3〉에서 토양의 뿌리 구역에서 토양 수분이 Mi(mm)만큼 사용 가능할 때 관개가 시행되며 관개량은 일정한 값 q이다. 관개 이후, 증발산에 의하여 토양내 이용가능 수량이 M1으로 저하되어 다시 관개가 시행될 때까지의 기간을 t일로 정한

다. 여기서 증발산량(ET)은 다음과 같다.

$$ET=q/t(\text{mm/day}) \quad (9)$$

<그림-3>에서 수익이 최대가 되는 토양 수분의 유지 수준을 M_0 라 하고, 이에 따른 최적의 관개량을 q_0 , 최적의 관개기간은 t_0 라고 하였다.

이에 반하여, 최적의 관개보다 과잉 급수에 의하여 수익이 감소된 데 따른 관개 비용의 증가를 C_1 원/mm-day-ha라 하고, 적은 관개량으로 수익이 감소된 데 따른 관개비용의 증가를 C_2 원/mm-day-ha라 정하였다. 또한, 관개에 필요한 인부임, 물값 등 제비용은 C_3 원/mm-day-ha로 정하였다. 이들 비용은 실제 영농 자료에 의하여 결정된다. 예로서, 상치의 생육 기간을 65일로 하고 관개량을 3가지로 구분하여 시행하였을 때 수익을 조사한 결과는 다음과 같다.

<표-2> 관개 수준별 수익성 조사 예

관개 조건	토양수분 유지수준	생산 수익
습윤	27.6mm	2,400천원/ ha
중간	21.6mm	2,730천원/ ha
건조	14.4mm	2,300천원/ ha

<표-2>의 분석 결과, 최적의 토양 수준의 유지 조건(M_0)은 21.0mm이며, 이 때 수익은 2,730천원/ha이다. 이에 따른 C_1 과 C_2 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_1=(2,730-2,400)/(27.6-21.0)/65 = 770\text{원/mm-day-ha}$$

$$C_2=(2,730-2,300)/(21.0-14.4)/65 = 1,000\text{원/mm-day-ha}$$

한편, <그림-3>에서 토양수분이 선형적으로 변화한다고 가정하면, 다음 식이 성립한다.

$$t_1/t=s/q, \quad t_1=st/q \quad (10)$$

$$t_2/t=(q-s)/s, \quad t_2=(q-s)t/q \quad (11)$$

여기서, t_1 은 이용가능한 토양 수분이 최적 토양

수분(M_0) 보다 많게 유지되는 일수이며, t_2 는 토양 수분이 최적 토양 수분(M_0)보다 적게 유지되는 일수이다.

또한, 최적의 토양 수분 보다 많은 토양 수분이 유지되는 기간의 수분량은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$(st/q) \times s/2=s^2t/(2q)(\text{mm-day}) \quad (12)$$

이에 따라서, 최적의 토양 수분 보다 많은 수분이 유지되는 기간의 평균적인 일별 토양 수분량은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$s^2t/(2q \times t)=s^2/2q(\text{mm}) \quad (13)$$

토양 수분이 최적 조건 이상으로 유지되는데 따른 비용의 증가액은 $C_1 \times s^2/2q$ 이다. 한편, 토양 수분이 최적 조건 이하로 유지되는데 따른 비용의 증가액은 $C_2 \times (q-s)^2/2q$ 이다. 또한, 일별 인부임과 물값은 이들 제 비용을 관개 기간의 간격(t)으로 나누어 산정한다. 여기서, $t=q/ET$ 이며, 일별 제 비용은 다음과 같다.

$$C_3/t=C_3/ET/q \quad (14)$$

이러한 계산 결과에 의하여 전체 비용의 증가량은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$C(s,q)=C_1 \times s^2/2q+C_2 \times (q-s)^2/2q+C_3/ET/q \quad (15)$$

이에 의한 최적의 관개 계획을 수립하려면 식 (15)를 s 와 q 에 의하여 미분하여 얻을 수 있다. 즉,

$$dC/ds=0, \quad s_0=q_0 C_2/(C_1-C_2) \quad (16)$$

$$dC/dq=0, \quad q_0=\{2ETC_3(C_1+C_2)/(C_1 C_2)\}^{0.5} \quad (17)$$

위의 식과 초기의 토양 수분을 이용하면, 최적의 관개시기와 관개량을 산출할 수 있다.

$$M_1 = M_0 + s_0 - q_0 \quad (18)$$

결과적으로, 최적의 관개기간 간격은 다음 식으로 산정된다.

$$t_0 = q_0 / ET \quad (19)$$

이상의 방법은 영농 자료의 수집에 의하여 활용 가능하며, 특히 M_1 , q_0 , t_0 가 알려져 있을 때 최적의 수익과 최소의 영농 경비를 지출할 수 있는 관개 계획을 수립하는데 효과적인 것으로 판단된다. 그러나, 이들 방법은 강우에 의한 수분공급의 영향을 무시한 것으로서 우리나라와 같이 강우의 계절적인 변화가 심하고 확실적인 예측이 어려운 여건에서 직접적으로 적용하는데 무리가 있다. 또한 생산물의 출하 가격의 변동이 심한 여건을 고려한다면 수익성을 고려한 관개 계획의 수립은 더욱 어려운 과제이다.

Thoradeniya(1995)는 강우지역에서 비의 관개 계획에 관하여 연구한 바 있으며, 이는 태국 등에서 24년간 관측한 강우 자료를 확률 처리하고 FAO에서 만든 CROPWAT 모델을 사용한 것으로서, 1995년 로마에서 개최된 ICID 회의에서 보고된 바 있다. 이러한 연구 결과를 적용하기 위하여는 좀 더 현장 자료에 의한 검정과 연구 보완이 필요한 것으로 사료된다.

참고문헌

- A. Benami & A. Ofen, 1983. Irrigation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Technion- Israel Institute of Technology.
- ICID, 1995. ICID /FAO Workshop on Irrigation Scheduling : From Theory to Practice, Thematic report, 46th International Executive Council.
- Thoradeniya, W.B.M., 1995. Optimization of Irrigation water releases for rice growing in the wet season using probable rainfall. Submitted to ICID-FAO workshop, Rome 1995.

약 력

박 상 현



1974. 서울대학교 농과대학 농공학과 졸업
1982. 건국대학교 대학원 농학석사
1982. 농어업토목 기술사
현재 농어촌진흥공사 농어촌연구원 수리 시험 수석연구원
KCID 관개배수실행분과 위원장
/편집·학술분과위원
ICID 관개배수실행분과 위원